

РАСЧЕТ УСРЕДНЕННОГО И ПАРЦИАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДА УГЛЕРОДА И МАРГАНЦА ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

В работе приводится методика оценки парциальных коэффициентов перехода при ручной дуговой сварке и результаты расчетов.

Ключевые слова: *ручная дуговая сварка, коэффициент перехода элемента, расчет состава металла шва.*

При сварке покрытыми электродами состав наплавленного металла и его сварочно-технологические свойства зависят от условий плавления стержня и покрытия и взаимодействия образовавшихся фаз друг с другом и газом.

Состав наплавленного металла может быть определен, если известны общие, усредненные коэффициенты перехода элементов. Последние находят чаще всего экспериментально для конкретных условий сварки, что не позволяет гарантировать точность прогноза при изменившихся условиях. В связи с этим была разработана методика определения парциальных коэффициентов перехода элементов, т. е. коэффициентов перехода на каждой стадии нагрева и плавления, и их зависимости от параметров режима сварки.

Описание методики. Общий коэффициент перехода элемента показывает, какая доля элемента теряется в процессе сварки. При плавлении электрода протекают следующие процессы в дуговом промежутке:

- плавление стержня электрода и формирование капель металла;
- плавление металлической части покрытия электрода (ферросплавов) и формирование капель металла;

- плавление неметаллической части покрытия электрода (оксидов, органических соединений) и формирование капель шлака;
- удаление газообразных компонентов из зоны сварки;
- восстановление металлических компонентов из оксидов шлака.

В соответствии с выделенными процессами, протекающими при плавлении электрода, введем следующие обозначения:

$K_1^{\mathcal{E}_i}$ – доля массы компонента \mathcal{E}_i металлической части покрытия электрода, окисляемой газом и шлаком;

$K_2^{\mathcal{E}_i}$ – доля массы компонента \mathcal{E}_i металла стержня, окисляемой газом и шлаком;

$K_3^{\mathcal{E}_i}$ – доля массы оксида компонента \mathcal{E}_i неметаллической части шихты (покрытия), переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли.

Введем уравнения, связывающие величины $K_1^{\mathcal{E}_i}$, $K_2^{\mathcal{E}_i}$ и $K_3^{\mathcal{E}_i}$ с парциальными коэффициентами перехода $\eta_{\mathcal{E}_i}$:

$$1 - K_1^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}}, \quad (1)$$

$$1 - K_2^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}}, \quad (2)$$

$$K_3^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}}, \quad (3)$$

где $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}}$, $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}}$, $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}}$ – парциальные коэффициенты перехода элемента \mathcal{E}_i в наплавленный металл из стержня, ферросплавов и шлака соответственно.

В связи с этим можно предположить, что общий (усредненный) коэффициент перехода имеет следующую взаимосвязь с парциальными коэффициентами:

$$\eta_{\mathcal{E}_i} = a\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} + b\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}} + c\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + b(1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + cK_3^{\mathcal{E}_i}, \quad (4)$$

где a , b , c – доли участия электродного стержня, ферросплавов и восстановленных из шлака компонентов в наплавленном металле; $\eta_{\mathcal{E}_i}$ – общий, усредненный коэффициент перехода элемента \mathcal{E}_i .

Определение парциальных коэффициентов перехода заключается в решении системы уравнений с тремя неизвестными (5).

$$\eta_{\mathcal{E}_i} = a \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}} + c \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}} = \frac{m_{\mathcal{E}Л}}{m_{\text{н.м}}} \frac{1 - K_{\text{пот}}}{1 + K_{\text{мп}}} \times \left\{ (1 - K_2^{\mathcal{E}_i} - K_3^{\mathcal{E}_i}) + \frac{K_{\text{мп}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} (1 - K_1^{\mathcal{E}_i} - K_3^{\mathcal{E}_i}) + K_3^{\mathcal{E}_i} \right\}, \quad (5)$$

$$m_{\mathcal{E}_i} = m_{\mathcal{E}Л} \frac{1 - K_{\text{пот}}}{1 + K_{\text{мп}}} \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} (1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + \frac{K_{\text{мп}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left(\sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{св}}}{100} \right) \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}} K_3^{\mathcal{E}_i} \right\}$$

$$m_{\mathcal{E}_{in} O_m} = \frac{m_{\mathcal{E}Л} K (1 - K_{\text{пот}})}{1 + K_{\text{мп}}} \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_2^{\mathcal{E}_i} + \frac{K_{\text{мп}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left(\sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_1^{\mathcal{E}_i} + \left(\sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{св}}}{100} \right) (1 - K_3^{\mathcal{E}_i}) \right) \right\}$$

где $m_{\mathcal{E}_i}$ – масса элемента \mathcal{E}_i в данном объеме металла, кг; $m_{\mathcal{E}Л}$ – масса электрода, кг; $K_{\text{пот}}$ – коэффициент потерь, учитывающий испарение компонентов и разбрызгивание металла; $K_{\text{мп}}$ – коэффициент массы покрытия; $[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}$ – концентрация компонента \mathcal{E}_i в стержне электрода, мас.%; $\% \text{фер}_k$ – концентрация ферросплава k в покрытии электрода, мас.%; $[\mathcal{E}_i]_k$ – концентрация компонента \mathcal{E}_i в ферросплаве k , мас.%; $\% j$ – концентрация минерала j в покрытии электрода, мас.%; $(\mathcal{E}_{in} O_m)$ – концентрация оксида $\mathcal{E}_{in} O_m$ в минерале j , мас.%; $(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{св}}$ – концентрация оксида $\mathcal{E}_{in} O_m$ в жидком стекле, мас.%; $M_{\mathcal{E}_i}$ – атомная масса элемента \mathcal{E}_i , кг/моль; $M_{\mathcal{E}_{in} O_m}$ – молекулярная масса оксида $\mathcal{E}_{in} O_m$, кг/моль; $m_{\mathcal{E}_{in} O_m}$ – масса оксида $\mathcal{E}_{in} O_m$ в шлаке, кг; α – содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода, мас.%; β – массовая доля сухого остатка связующего.

Массу компонента в металлической или шлаковой ванне определяем следующим образом.

$$m_{\mathcal{E}_i} = \frac{m_{\text{св. ванны}} \cdot [\mathcal{E}_i]_{\text{распл}}}{100}; \quad (6)$$

$$m_{\mathcal{E}_{in}O_m} = \frac{m_{\text{шлак.ванны}} \cdot (\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{распл}}}{100}, \quad (7)$$

где $m_{\text{св.ванны}}$ – масса сварочной ванны, кг; $[\mathcal{E}_i]_{\text{распл}}$ – концентрация компонента \mathcal{E}_i в расплаве (сварочной ванне), мас.%; $m_{\text{шлак.ванны}}$ – масса шлаковой ванны, кг; $(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{распл}}$ – концентрация оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в шлаке (шлаковой ванне), мас.%.

Для решения системы уравнений (5) необходимы следующие справочные: коэффициент массы покрытия; концентрация компонента \mathcal{E}_i в стержне электрода; концентрация ферросплава k в покрытии электрода; концентрация компонента \mathcal{E}_i в ферросплаве k ; концентрация минерала j в покрытии электрода; концентрация оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в минерале j ; атомная масса элемента \mathcal{E}_i ; молекулярная масса оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$; масса оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в шлаке; содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода; массовая доля сухого остатка связующего, а также экспериментальные данные: масса сварочной ванны; концентрация компонента \mathcal{E}_i в расплаве; коэффициент потерь; масса шлаковой ванны; масса расплавленного электрода; концентрация оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в шлаке.

Предварительные эксперименты показали, что изменение масс сварочной и шлаковой ванн при варьировании параметров режима достаточно хорошо коррелирует с мощностью дуги [1].

Проведение эксперимента. Наплавка осуществлялась на сварочном посту, оборудованном источником питания ВД-315 и включенными в схему магнитоэлектрическими измерительными приборами (амперметром и вольтметром).

Образец представлял собой пластину размером 50x200x8 мм из стали Ст3 по ГОСТ 380-94. Образец подвергался зачистке от окалины и прочих загрязнений до металлического блеска. Затем осуществлялась наплавка ниточного валика на проход на заданном режиме с целью определения массы израсходованного электрода и массы наплавленного металла и шлака. Во время наплавки проводились измерения мгновенных значений тока и напряжения. После

взвешивания на эту же пластину наплавлялся валик в 5 слоев для получения в верхнем слое чистого наплавленного металла, т. е. без влияния основного металла.

Наплавка производилась в нижнем положении на рекомендованных в ТУ режимах. На каждый диаметр электрода режим настраивался трижды: минимальное значение в рекомендованном диапазоне, среднее значение из диапазона и максимальное. Режимы наплавки ниточного и многослойного валиков на одной пластине совпадали.

При проведении расчетов удобнее оперировать данными, пересчитанными на 100 г расплавленного электрода.

Эксперимент позволил найти значения масс сварочной и шлаковой ванн при заданных параметрах режима, а также установить зависимость между массами сварочной и шлаковой ванн и мощностью дуги.

Также были рассчитаны парциальные и усредненные коэффициенты перехода углерода и марганца в наплавленный металл при ручной дуговой сварке электродами УОНИ 13/55 диаметром 4 мм. В результате обработки экспериментальных и расчетных данных получены регрессионные уравнения для расчета:

$$\eta_C^2 = 1,186 - 0,118P; \quad (8)$$

$$\eta_{Mn}^1 = 0,55 - 0,4P; \quad (9)$$

$$\eta_{Mn}^2 = 0,59 - 0,05P. \quad (10)$$

Здесь P – мощность дуги, кВт.

Заключение

Разработанная методика позволяет оценивать парциальные коэффициенты перехода элементов в зависимости от параметров режима.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, контракт № Н979.42Б.002/14 «Исследование физических и химических процессов в зоне сварки для создания научных основ оптимизации технологий и разработки материалов».

Литература

1. Вотинова Е. Б., Шалимов М. П. Разработка методики расчета состава металла шва при сварке покрытыми электродами или порошковой проволокой // Сварка и диагностика. 2011. № 5. С. 31–35.